

**INSTITUTO DE FÍSICA**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO**  
**UFRJ**  
**CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

**Trabalho de conclusão de curso**

**O DESENVOLVIMENTO DA ÓPTICA: DA ANTIGUIDADE À IDADE CONTEMPORÂNEA.**

**Ronald Rodriguez Costa**

**Riode Janeiro**

**Setembro/2015**

**O DESENVOLVIMENTO DA ÓPTICA: DA ANTIGUIDADE À IDADE CONTEMPORÂNEA.**

**Ronald Rodriguez Costa**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de licenciado em Física.**

**Orientador**

**Carlos Renato de Carvalho**

**Universidade Federal do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro)**

**2015**

## **Agradecimentos.**

Agradeço primeiramente à minha mãe, Norma Pinho Rodriguez por toda a ajuda e incentivo que mesmo morando tão longe não me deixou desistir.

Ao meu falecido pai, Jurandir de Assis Costa que sempre com bom humor me deu seu incentivo para continuar.

À minha esposa, Carolina dos Anjos Pires que tanto me ajuda e compreende que o que faço é para o nosso bem.

À minha irmã, Patrícia Rodriguez Carvalhal que me ajuda a cuidar dos meus cachorros e de minha casa quando não posso estar presente.

À minha sogra, Joana Maria dos Anjos que tanto nos ajuda em casa e com a criação do meu filho.

Ao meu padraсто, o qual eu considero um pai, Francisco José Moreira Monforte. Sempre me incentivando.

Aos amigos e família, sempre com palavras positivas.

Ao meu professor, Carlos Renato de Carvalho, que teve tanta paciência e dedicação com ensinamentos e para a conclusão deste trabalho.

À minha família paraense: minha segunda mãe Regina de Fatima Oliveira de Aguiar, meu pai do coração Damião Rocha Oliveira de Aguiar e aos meus irmãos, Carlos Edimilson Oliveira de Aguiar, Carlos Luciano de Oliveira de Aguiar e João Tiago Oliveira de Aguiar.

À minha maior fonte de inspiração, meu filho Bernardo dos Anjos Pires Rodriguez Costa, que foi meu grande motivo para o término deste curso, pois sem ele teria desistido da graduação e seguido uma vida “offshore” como mergulhador profissional.

## **OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho é mostrar e propor uma possível abordagem de conceitos da física em uma sala de aula de ensino médio, de uma maneira mais conceitual e histórica, dando ao aluno a origem de muitas ideias, que muitas vezes para o aluno não parece fazer o menor sentido.

Além de mostrar a época e as pessoas envolvidas no desenvolvimento da óptica, com o passar dos séculos, é importante associar essas ideias ao interesse econômico e militar. E a grande importância destas ideias para o desenvolvimento de novas tecnologias. Além de ser mais atrativa do que uma aula repleta de contas e equações.

## RESUMO

A maneira de se interpretar a natureza passou por várias mudanças com o passar dos séculos, como veremos neste trabalho, várias foram as maneiras de se explicar o mecanismo da visão e a natureza da luz, desde pensadores da antiguidade que usavam mitologia para explicar o que não se conseguia interpretar de maneira mais racional até as concepções da natureza da luz no século XVIII.

O trabalho começa falando de mitologia como uma tentativa de justificar os fenômenos que são desconhecidos pelo homem da antiguidade. Vários foram os povos que se aventuraram a criar essas relações com fenômenos naturais e essas figuras mitológicas. Quando falamos de luz, o sol sem dúvida ocupa importante lugar na hierarquia dos deuses, mas nem sempre ocupa o topo desta hierarquia.

Depois da mitologia, veremos alguns filósofos gregos que começavam a usar a razão para descrever aquilo que viam na natureza. Alguns tiveram maior destaque na história e que mais influenciaram as futuras gerações de filósofos romanos, filósofos da Alexandria, hindus e árabes. A maior preocupação destes filósofos, no que diz respeito à luz, era a explicação do mecanismo da visão. Várias foram as concepções que passavam por constantes mudanças a fim de driblar os problemas mal resolvidos e críticas geradas por filósofos da oposição, isso se deu por séculos. As teorias mais faladas foram: a teoria dos raios visuais e a Eidola ou espécie, as ideias que surgiram após estas duas concepções, na verdade tinham as mesmas bases dos raios visuais e Eidola, porém com algumas modificações para tentar sair das críticas da oposição.

Um filósofo árabe de maior destaque neste tema foi Alhazem, que teve maior sucesso na explicação do mecanismo da visão. Isso abriu caminho para uma nova explicação e mais próxima da realidade.

Kepler explicou de maneira correta a formação da imagem do olho e fez estudos sobre a refração abrindo as portas para o uso das lentes como instrumento para ciência e fazendo descobertas para a astronomia, assim como Galileu Galilei.

Agora para o homem, a ciência precisa ser experimentada quando o homem tenta descobrir além do comportamento da luz, mas também tenta entender a sua natureza e assim começa das discussões mais longas da física, que na verdade dura até hoje.

Palavras-chave: Ensino Médio, filosofia, história, Física, óptica.

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1- ANTIGUIDADE E IDADE MÉDIA.....8

1.1 Mitologia.....	8
1.2 Aristóteles.....	9
1.3 Euclides.....	9
1.4 Concepção grega.....	10
1.5 Raios visuais.....	10
1.6 Teoria do Eidola.....	11
1.7 Filósofos romanos.....	13
1.8 Filósofos de Alexandria.....	13
1.9 Filósofos hindus.....	14
1.10 Filósofos árabes.....	14

### CAPÍTULO 2- ERA MODERNA- SÉCULOS XVII E XVIII...18

2.1 Johannes Keppler.....	18
2.2 Galileu Galilei.....	20
2.3 As novas ideias de Snell e Descartes.....	22
2.4 Grimaldi e Hooke.....	23
2.5 Onda ou partícula?.....	23

### CAPÍTULO 3- CONTRORVÉRSIAS ENTRE NEWTON E HUYGENS(ONDA-PARTÍCULA)...26

3.1 Transição intelectual.....	26
3.2 Huygens e a teoria ondulatória.....	26

3.3 O modelo corpuscular de Newton.....	28
<b>CAPÍTULO 4 – RESURGIMENTO DA TEORIA ONDULATÓRIA..</b>	<b>31</b>
4.1 Young e Fresnell.....	31
4.2 A experiência de Fizeau.....	33
4.3 Foucault.....	34
4.4 Ondas eletromagnéticas.....	35
4.5 “Conclusão sobre a natureza da luz”.....	38
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>40</b>

## **CAPÍTULO 1- ANTIGUIDADE E IDADE MÉDIA.**

### **1.1. Mitologia [BERNARDO, 2009]**

Os fenômenos luminosos sempre despertaram curiosidade no homem. No princípio, o homem primitivo não tinha ideia de como explicar tais fenômenos e alguns, como os dias e as noites que ocorriam de forma muito regular, induziram o homem a usar figuras mitológicas para explicá-los. Nas religiões politeístas, os deuses solares ocupavam uma posição de hierarquia privilegiada. Eles induziam um grande respeito e admiração no homem, pois eram tais deuses que lhes dava calor e os iluminavam durante o dia. Em diferentes regiões do mundo, os povos tinham sua maneira de manifestar gratidão ao deus sol, seja com sacrifícios, oferendas ou com orações.

Na mitologia egípcia, o sol não era visto como uma única figura. O sol do meio dia era chamado de Rá, Hórus era o sol da manhã e Atum era o pôr do sol. Os faraós egípcios se proclamavam descendentes dos deuses e lhes eram atribuídos poderes com os quais lhes diferenciavam dos outros homens, que os permitiam governar. Com o passar dos séculos, essas divindades foram se difundindo, dando origem a vários outros deuses. Na China o sol não ocupava o topo da hierarquia dos deuses, o topo era ocupado pelo Céu, seguido da terra, os antepassados dos imperadores, os deuses dos cereais e do solo, depois aparecia o deus do Sol. No Japão acontecia algo parecido, os deuses referentes ao Sol vinham em segundo plano.

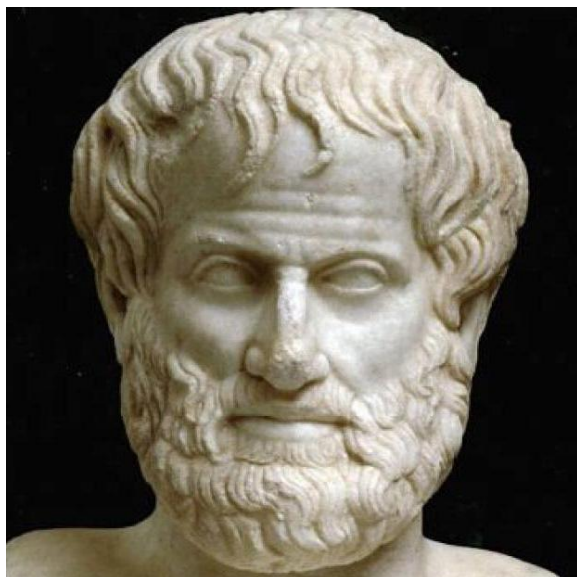
Com o passar dos anos o homem foi procurando respostas onde nem todas as explicações eram dadas usando mitologia.

### **1.2. Aristóteles (384-322 AC.) [BERNARDO, 2009]**

Aristóteles foi filho de um médico da corte do rei Amyntas III, avô de Alexandre, o Grande. Desde cedo teve a oportunidade de ter uma educação de qualidade, seu pai o orientou desde sempre para os estudos em medicina e biologia. Após a morte de seu pai em 367 AC.,



Aristóteles ingressou na academia de Atenas que era dirigida por Platão e ficou lá durante 20 anos. Quando Platão morreu, Aristóteles viajou durante anos pesquisando e desenvolvendo suas pesquisas sobre o mundo à sua volta. É difícil encontrar uma área de estudo na qual Aristóteles não tenha sequer emitido uma opinião a respeito.



**Fig.1.1**Aristóteles (384- 322 AC), uma dos maiores filósofos da Grécia antiga.

No que diz respeito à luz, na opinião de Aristóteles, esta era um estado que era alterado ou não com a presença de um corpo. Ele não via lógica em dizer que os olhos ou os objetos emitiam luz, os objetos simplesmente alteravam a transparência do meio, os tornando visíveis. No caso de não enxergarmos nada na escuridão, era justificado pelo fato de que uma fonte de luz tem como papel estimular o estado de transparência do meio, sem uma luminária ou o próprio Sol não havia estímulo para a alteração deste estado. Se houvesse um vazio entre o objeto e o observador não seria possível enxergar nada, pois não há o que ser alterado com a presença do objeto. Aristóteles nunca acreditou neste vazio.

### **1.3. Euclides (...-300 AC.) [BERNARDO, 2009]**

Famoso matemático que viveu em Alexandria, Euclides é considerado o fundador da óptica geométrica. Ele foi seguidor da hipótese de Pitágoras, que dizia que raios de luz saem dos olhos e atingem os objetos e trazem informação do mundo externo aos olhos. Esta é a teoria dos raios visuais e que o mesmo acontecia com as fontes de luz, os raios saem das fontes e viajam até os olhos. Euclides afirma que a luz se propaga em linha reta e que os

objetos que estão na linha dos raios visuais serão visto pelo observador. Em uma de suas obras, Euclides trata a questão da perspectiva, que mais tarde seria reformulada durante o Renascimento. Fez estudos com espelhos e estabeleceu as leis da reflexão.



**Fig. 1.2 Euclides (...-300 AC) matemático e filósofo de Alexandria.**

#### **1.4. Concepção grega [BERNARDO, 2009].**

Vários gregos tiveram sua tentativa de explicar o funcionamento da visão ou o que era de fato a luz, duas destas teorias que sobreviveram por séculos serão nosso destaque neste trabalho. De um lado diziam, que do objeto saíam finas camadas como se fosse uma “pele” que se dirigia aos olhos, permitindo que se enxergassem. Esta teoria é encontrada nas obras de alguns atomistas, como Epicuro, Leucipo e Demócrito. Esta é conhecida como “Eidola”.

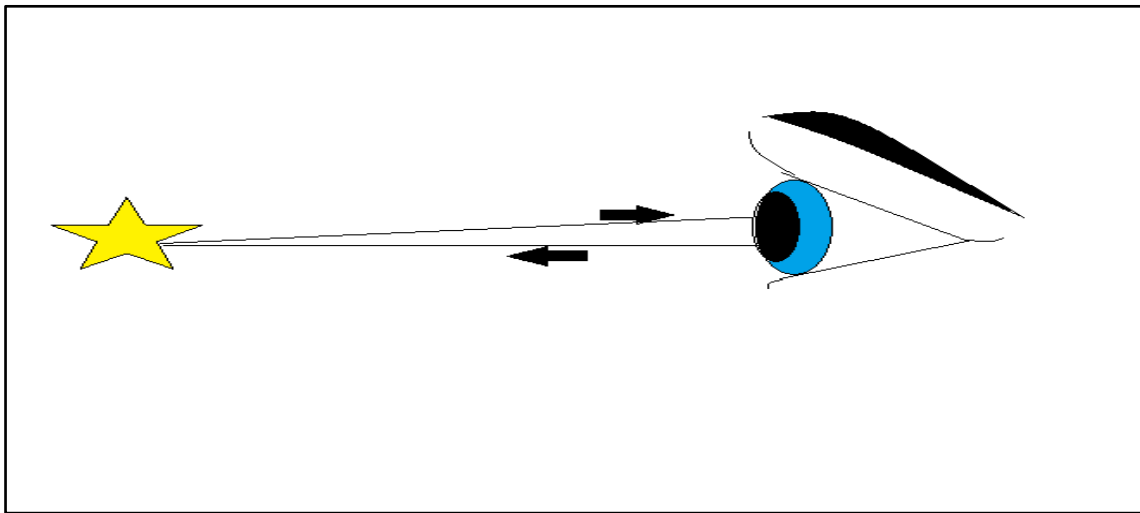
Outra linha de pensadores afirma que a visão começa no próprio olho, de onde saem raios visuais que atingem os objetos e traz a informação de fora, essa linha de pensamento é defendida por Empédocles, Platão, Pitágoras e Euclides.

#### **1.5. Os raios visuais. [BERNARDO, 2009],[RONCHI, 1957].**

Na teoria dos raios visuais, a visão era explicada como algum tipo de contato, era inaceitável uma ação à distância, já que com os outros sentidos era necessário um contato direto para seu funcionamento. Com os olhos fechados você toca nos objetos e tem uma ideia

de forma, temperatura e tamanho. Com o olfato, você tem um contato com o vapor com o nariz tendo o conhecimento do cheiro da substância. Para saber o gosto de um alimento é preciso que este chegue até sua língua. Para ouvir é necessário que o som chegue até seus ouvidos. Logo a visão precisaria de um contato com o meio externo para coletar informações.

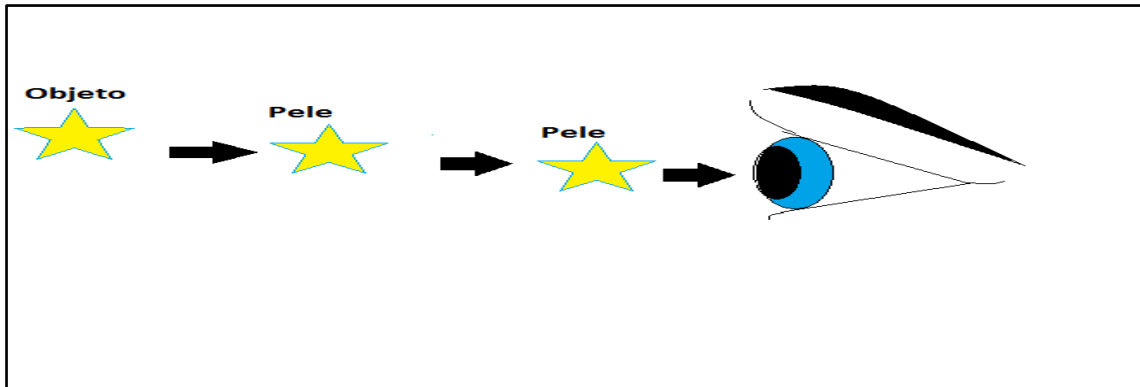
A teoria dos raios visuais, dizia que eram raios que saiam dos olhos e coletavam informações do objeto através do contato entre os raios e o objeto. Esta ideia se baseava em como um homem cego com uma vara de madeira poderia obter algumas informações como a forma ou tamanho deste objeto.



**Fig.1.3** Representação dos raios visuais.

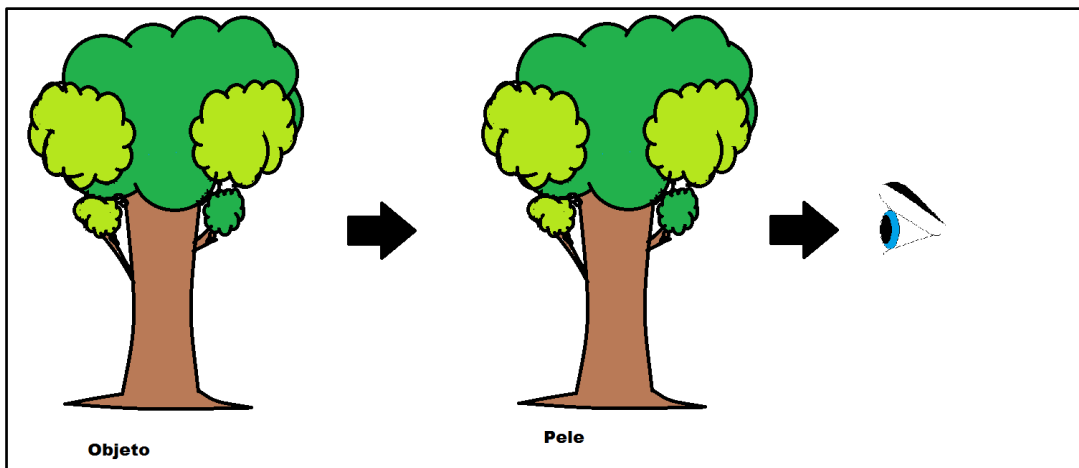
### **1.6. Teoria do Eidola [BERNARDO, 2009], [RONCHI, 1957].**

Esta teoria assumia que uma superfície que deixava o corpo carregando informações, como tamanho, forma, cor e distância com grande precisão. Esta superfície era conhecida como Eidola, ou pele, ou “espécies”, que foi o nome latino dado por Lucrécio e como ficou mais tarde conhecido na Idade Média.



**Fig.1.4** Representação da teoria do Eidola.

Logo alguns problemas com esta teoria vieram a surgir. Um deles era explicar como a superfície de corpos de grandes dimensões, como árvores e casas, entravam em uma pupila de aproximadamente 2 mm.



**Fig.1.5** Representação de um dos problemas da Eidola, uma árvore grande entrando na pupila.

Afim de driblar este problema com a hipótese, foi adicionada a ideia de que as imagens deveriam diminuir a diferentes taxas, essas taxas variam de acordo com as dimensões que os objetos possuem e sua distância ao observador.

Mas um problema para a teoria dos raios visuais e a Eidola, era a pergunta que ainda não tinha como se explicar. Como não se enxergava objetos no escuro, uma vez que em ambas as teorias não se havia a necessidade de um agente externo, uma fonte de luz.

### **1.7. Filósofos romanos. [BERNARDO, 2009], [RONCHI, 1957].**

Dos filósofos romanos, pouco se questionou as ideias básicas dos filósofos gregos Epicuro, Demócrito e Leucipo. Para o filósofo romano Lucrécio (98-55 AC.) não há cores sem luz. Defensor da teoria do Eidola, os corpos soltam uma “pele” ou “casca”, a qual chega aos olhos e podemos enxergar graças a essas imagens. Se o objeto for fragmentado e reduzido a pedaços cada vez menores, fica cada vez mais difícil de ser visto e que lhe induziu a acreditar que os átomos eram invisíveis. O nome desta teoria foi alterado por Lucrécio para species(espécies), o qual ganhou grande popularidade entre os filósofos medievais europeus.

### **1.8. Filósofos de Alexandria. [BERNARDO, 2009].**

Herão foi um filósofo que escreveu livros em diversas áreas e desenvolveu diferentes máquinas, uma em especial que é conhecida como brinquedo de Herão, uma pequena máquina térmica. Sobre a luz, Herão disse que, se estrelas e outros astros estão a distâncias infinitas, a velocidade desses raios também deveria ser infinita, pois mal abrimos os olhos na direção das estrelas e conseguimos vê-las.

Essa contribuição foi modesta se comparada com a de outro filósofo, Ptolomeu. Este é considerado um dos maiores sábios gregos do império romano. Sua concepção sobre a visão era similar à de Euclides, ou seja, a de que raios saiam dos olhos e capturavam informação sobre o objeto. No entanto, estes raios dependiam da luz do meio, quanto mais intensa for a luz ambiente, maior é a eficácia dos raios visuais. Ao que se sabe, não há nenhum relato nas obras de Ptolomeu sobre a natureza da luz.

### **1.9. Filósofos hindus. [BERNARDO, 2009].**

Na Índia, nascia um intenso movimento filosófico em paralelo com Alexandria. No fim o século I, Gautoma afirma em sua obra que: “é impossível objetos emitirem raios por si só, estes raios saem dos olhos e coletam informações sobre o mundo”. Estas ideias são repetidas, pois as concepções gregas são de grande influência na cultura hindu e de muitos povos. Essas teorias sobreviveram por séculos, algumas sofreram pequenas modificações a fim de se desviar das perguntas mal respondidas, dando origem a outras teorias com as mesmas bases, boa parte destas teorias perderam todo sentido com os séculos.

Apesar de todo absurdo da teoria dos raios visuais e da Eidola, estas teorias duraram até o século XI, esta nova época foi marcada pela presença dos árabes na física e na matemática.

### **1.10. Filósofos árabes. [BERNARDO, 2009], [RONCHI, 1957].**

A filosofia árabe teve forte influência grega e tinha uma base forte nas teorias aristotélicas, as cores eram características secundárias resultante de outras qualidades. Uma das maiores preocupações dos árabes referentes à luz era a explicação do mecanismo da visão.

Em especial, o nome mais falado, no que diz respeito aos pensadores árabes, é o Al-Haitham (965-1038) ou Alhazem como também é conhecido. Alhazem não aceitava a teoria dos raios visuais como explicação para o mecanismo da visão. Para Alhazem a visão só é possível se houver um agente externo, uma fonte de luz, seja o sol ou mesmo uma vela. Estas fontes liberam algum tipo de substância que ao tocar nos objetos refletem e se espalham em todas as direções.



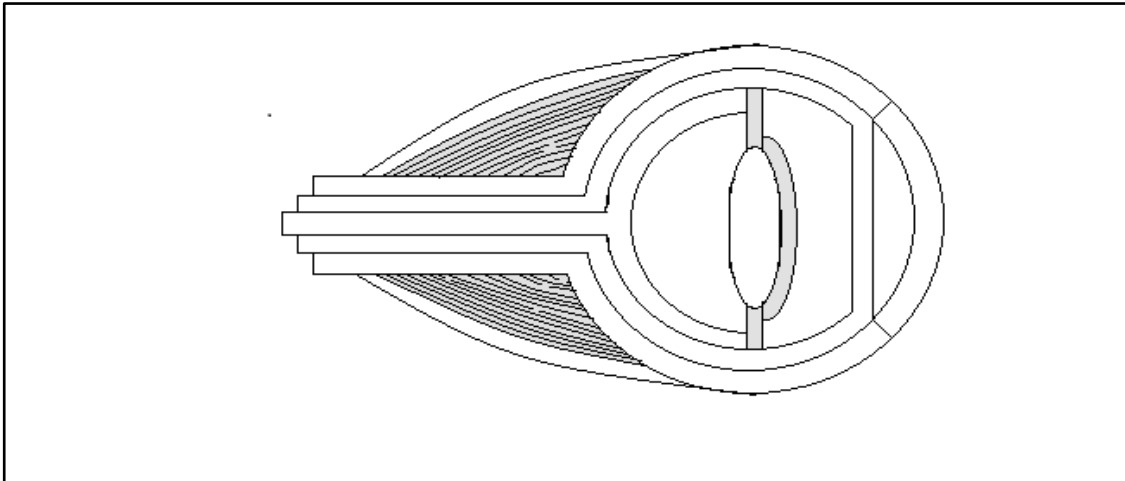
**Fig.1. 6 Al-Haitham (965-1038) filósofo árabe de maior destaque.**

Alhazem, desconfiando da validade das teorias que explicavam a visão naquela época, levantou alguns questionamentos. O primeiro foi: “por que ao olharmos para o sol e ao fecharmos os olhos ainda conseguimos ver a imagem do sol?”

Se a teoria dos raios visuais estivesse certa, ao fecharmos os olhos, não deveria ter imagem chegando a nossa mente, pois a dependência da formação da imagem começa nos olhos e com os olhos fechados esses raios não sairiam dos olhos. Outra questão foi, como que, olhando diretamente para o sol, você sente dor, se os raios saíram de seus olhos, não deveriam lhe causar dor quando voltassem.

Quanto ao problema da teoria do Eidola, para a imagem de grandes corpos que entram na pupila, a teoria de Alhazem resolve bem este mistério. Ele afirma que a imagem não diminui a diferentes taxas, na verdade o corpo é formado de pequenos pontos e cada um desses pontos emite um raio em várias direções e cada raio emitido de um ponto entra facilmente na pupila qualquer que seja o tamanho do objeto.

Alhazem tentou explicar a estrutura do globo ocular, sendo constituído por estruturas cuja maior parte, esféricas e concêntricas como mostra a figura abaixo.



**Fig.1.7Estrutura do globo ocular de Alhazem.**

Os raios que passam pela córnea podem ser perpendiculares ou não. Se for perpendicular à superfície, o raio passa sem qualquer desvio. Caso haja uma inclinação, este raio refrata e perde uma parte de seu poder de estimular os sensores. Um objeto que se encontre bem na frente do observador teria sua imagem bem preservada, enquanto outros objetos e coisas ao seu redor não seriam tão nítidos, mas teriam sua imagem bem formada, quando o observador se virasse e ficasse de frente para o objeto.

Alhazem sabia que os raios, ao entrar na pupila e se cruzar no centro do globo ocular, formariam uma imagem invertida, isso parecia um absurdo, pois não vemos o mundo assim. Ele foi assim induzido a admitir que a imagem se formasse no cristalino, mesmo sabendo que o cristalino é transparente, admitiu que o sensor fosse localizado na frente do olho e este enviava a imagem correta para a mente.

A ideia de que a influência do sol, ou seja, de uma fonte externa de luz é a explicação desses raios, que batem nos objetos e descrevem uma trajetória reta em direção aos olhos, deram pela primeira vez na história a característica corpuscular para os raios de lúmen, o que chamamos hoje de luz.

Alhazem também diz que não podemos confiar sempre em nossos olhos, nem sempre o que você vê é o que realmente é. Isso acontece na ilusão de óptica.

Os trabalhos de Alhazem foram difundidos no Ocidente no século XIII, ao ser traduzido e estudado por cientistas da época, mas apesar da teoria dos raios visuais já ter sido considerada obsoleta, as ideias de Alhazem não foram tão bem aceitas, pois matemáticos



ainda usavam os raios visuais, pois explicava bem a perspectiva. Com esses raios saindo dos, entendia-se melhor, como objetos de grandes dimensões vistos de longe, pareciam ser tão pequenos. Como mostra a figura 8.



**Fig. 1.8 A visão para Euclides em uma representação presente na obra de Robert Flud. O homem, que está à esquerda, emite os raios visuais que atingem o busto à direita, as linhas tracejadas que estão entre o olho e a estátua são os raios visuais.**

Os matemáticos desta época, apesar de operar com os raios visuais, tiveram sucesso na formulação de algumas leis, como a lei da reflexão. Esses raios visuais foram também aproveitados em superfícies esféricas, como espelhos côncavos e convexos e muitas dessas propriedades são usadas até hoje na física.

Outro enigma que durou muitos anos foi o fenômeno da refração. Por séculos tentaram formular leis que explicassem este fenômeno, a mais antiga delas, encontrada no Catoptrics, atribuída a Euclides. Outros propuseram complicadas equações que não levaram a nada.

Alguns trabalhos logo depois de Alhazem foram feitos, mas não foram de grande contribuição para o avanço da óptica. Durante anos se tentou explicar por meio de teorias e experimentos, fenômenos como a refração, mas nada se conseguiu de concreto. Porém nomes como Roger Bacon (1220-1292) e Witelo (1220-1278), seguidores de Alhazem, não deixaram que seus trabalhos se perdessem no tempo.

## CAPÍTULO 2- ERA MODERNA- SÉCULOS XVII E XVIII.

### 2.1. Johannes Kepler [BERNARDO, 2009], [RONCHI, 1957].

A óptica deu um grande passo no ano de 1604, quando Johannes Kepler (1571-1630) publicou uma obra intitulada *Ad Vitellionem Paralipomena (Suplemento ao Vitelo)*. Esta obra tinha tal grandeza que fez com que seu antecessor ficasse quase esquecido. Em seus escritos, Kepler propôs primeiramente explicar de vez o mecanismo do olho humano. Sua ideia era a seguinte, todo corpo é formado por infinitos pontos e estes pontos emitem raios de luz que chegam aos nossos olhos. Até então era o mesmo que Alhazem havia explicado, o grande diferencial era que esses raios não formavam uma imagem no meio do olho, ou no cristalino, esses raios atravessam a córnea, o cristalino o humor vítreo e atingem a retina, formando uma imagem invertida, o que era um absurdo para Alhazem, uma vez que não vimos o mundo de “cabeça para baixo”. Por exemplo: os raios de luz que vêm de uma estrela, seus raios refratados formam um cone cuja base deste é a pupila e no vértice se encontra a imagem da estrela e este vértice é formado na retina.

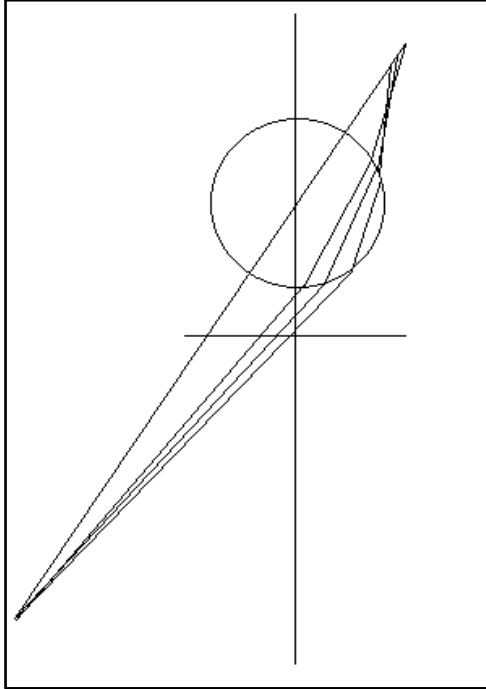


Fig.2.1 Johannes Kepler (1571-1639).

Kepler iniciou seus estudos sobre a refração usando uma esfera de água, com isso fez conclusões sobre a formação da imagem no globo ocular. Usando a relação

$$i/r=k$$

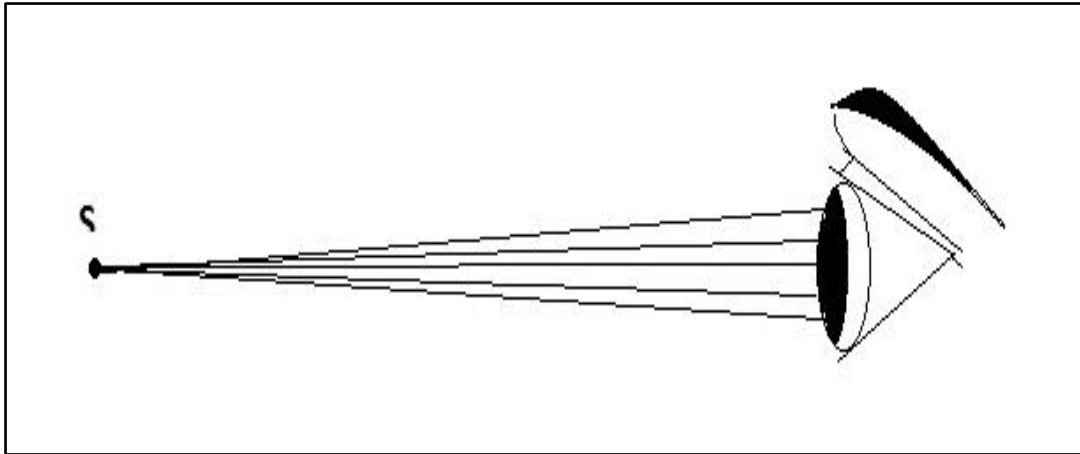
Onde  $i$  é o ângulo do raio de incidência,  $r$  é o ângulo do raio refratado e  $k$  é uma constante. Esta relação é bem comportada para ângulos até 30 graus, no caso da água ele achou um valor de  $k=4/3$ .



**Fig.2.2 Diagrama de Kepler, representando uma gota d'água refratando a luz.**

Esses estudos o fizeram primeiro a ter conclusões corretas da real função da pupila e o fez chegar à conclusão de que os raios, ao atravessar o globo ocular, chegam até a retina, onde atingemos sensores, os quais são responsáveis pela condução dos sinais para a mente e esta se encarrega da interpretação de uma imagem.

As ideias de Kepler permanecem hoje, mesmo que seja com uma abordagem um pouco diferente. Ele introduziu uma explicação da formação de imagens em espelhos planos, usando argumentos de simetria e um argumento, o qual chamou de triângulo telemétrico.



**Fig.2.3 Triângulo telescópico de Kepler .**

Sete anos depois do Suplemento ao Vitelo, em um de seus manuscritos, Kepler explica o funcionamento das misteriosas lentes, e explica que na verdade o que os óculos fazem é variar a convergência dos raios, a fim de acomodá-los na retina. Os mesmos óculos que eram mal compreendidos e não eram bem aceitos no século XIII, pois alterava a realidade do que se via, mas que eram capazes de corrigir misteriosamente alguns defeitos da visão de velhos artesãos e que não estavam preocupados com a ciência de seu funcionamento e, graças a estes artesãos, os óculos não foram esquecidos no tempo.

## **2.2 Galileu Galilei. [BERNARDO, 2009], [RONCHI, 1957].**

Em 1609, o telescópio que ainda tinha uma má reputação devido ao uso de lentes, assim como os óculos, ganhou uma atenção especial de um homem que o faria um instrumento de grande importância na astronomia. Galileu Galilei (1564-1632) ouviu falar da invenção de origem holandesa e rapidamente se interessou e construiu algumas versões, fez importantes descobertas, a principal delas na época, os satélites de Júpiter, o qual lançou em um livro chamado de Mensagem Sideral. Logo o livro foi criticado, pois Galileu usava um instrumento que era mal compreendido na época e assim como as lentes dos óculos, era visto como algo que alterasse a realidade e não era levado a sério por muitos filósofos, o instrumento não era confiável.



**Fig. 2.4**Galileu fazendo observação com sua luneta.

A comunidade científica na época, ficou indignada com as afirmações de Galileu, uma vez que suas afirmações baseavam-se num instrumento sem qualquer confiança e o pior é que estas imagens só poderiam ser vistas com este instrumento. Galileu estava certo e confiante de suas observações, mas a ciência da época que tinha uma forte influência das doutrinas Aristotélicas e teologia cristã criou uma resistência a aceitação de suas ideias.

Quanto a natureza da luz, Galileu preferiu não opinar ou tentar fazer contribuições para este enigma. Ele admitiu que se sentia numa escuridão, quando o assunto era a natureza da luz, pois não tinha uma explicação satisfatória sobre o assunto. Em conversas, Galileu achava que a luz tinha sua origem no interior dos átomos.

Kepler até então, neutro na discussão, decidiu em 1610 colocar as mãos no instrumento feito por Galileu. Kepler também não acreditava no poder do aparelho e quando fez sua observação teve que concordar com Galileu e viu que ele estava certo.

Por mais de três séculos as lentes, que ficaram sob proibição da ciência. Finalmente começaram a ganhar grande importância e atenção. Kepler foi o primeiro a desenvolver teorias e, em 1611, em seu trabalho *Dioptrics* publicou trabalhos sobre as lentes, já que tinha como base trabalhos feitos há sete anos sobre a refração e então as lentes ganharam formulações matemáticas e passaram a ser instrumentos indispensáveis para a ciência.

Esses estudos e formulações matemáticas permitiram não só o avanço na astronomia, mas também possibilitou o desenvolvimento da microscopia nos séculos XVII e XVIII.

### 2.3 Novas ideias de Snell e Descartes [BERNARDO, 2009], [RONCHI, 1957].

Novos conceitos também foram introduzidos por Descartes(1596-1650), que deu grandes contribuições para a matemática e para ciência. Em 1637, publicou uma lei mais precisa para a refração, fazendo uso dos senos dos ângulos de incidência e de refração, complementando uma formulação iniciada por Willebrord Snell (1591-1626). Descartes afirmava ter começado suas leis do zero, sem ter como base qualquer outra notação ou trabalho de outro cientista, mas o mesmo era conhecido por roubar algumas ideias.

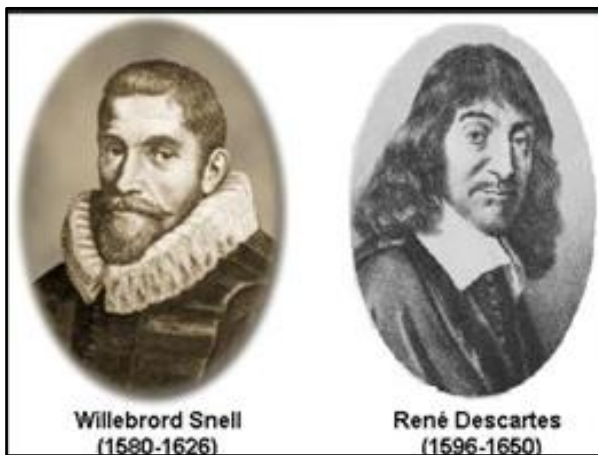


Fig.2.5 Duas grandes mentes e que deram grande contribuição na ciência, em destaque aqui neste trabalho, para a refração.

Kepler, assim como outros cientistas da época evitou falar sobre as cores. Até o século XVII, aceitava-se que a luz não tinha cor, a luz que vinha do sol era pura e incolor e ganhava cores ao encontrar com corpos, esta se manchava nesta interação. Novamente questões foram levantadas com base na observação de alguns fenômenos, o mais comum deles é: porquê a luz ao atravessar uma gota d'água, que é transparente, aparecem cores do outro lado projetadas;

Descartes deu o primeiro passo para a solução deste problema, que teve a contribuição de Francesco Grimaldi (1618-1663). Foi demonstrado que as cores não estão presentes nos objetos, começou a se falar em vibração para a luz e a luz foi cada vez mais se tornando uma parte da física.

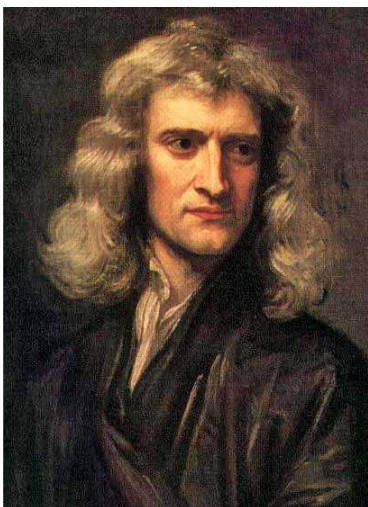
### 2.4 Grimaldi e Hooke. [BERNARDO, 2009], [RONCHI, 1957].

Francesco Grimaldifez uma interessante descoberta de uma propriedade da luz, a difração, que, no entanto, não fez muito sucesso com sua explicação. Alguns mistérios mal resolvidos ficaram sem solução. Robert Hooke (1635-1703), que foi discípulo de Robert Boyle (1627-1691), fez importantes contribuições para o aperfeiçoamento do microscópio. Hooke discordava de seu contemporâneo Isaac Newton sobre a teoria das cores e tinha uma concepção sobre a luz, assim como Descartes é puramente mecânica.

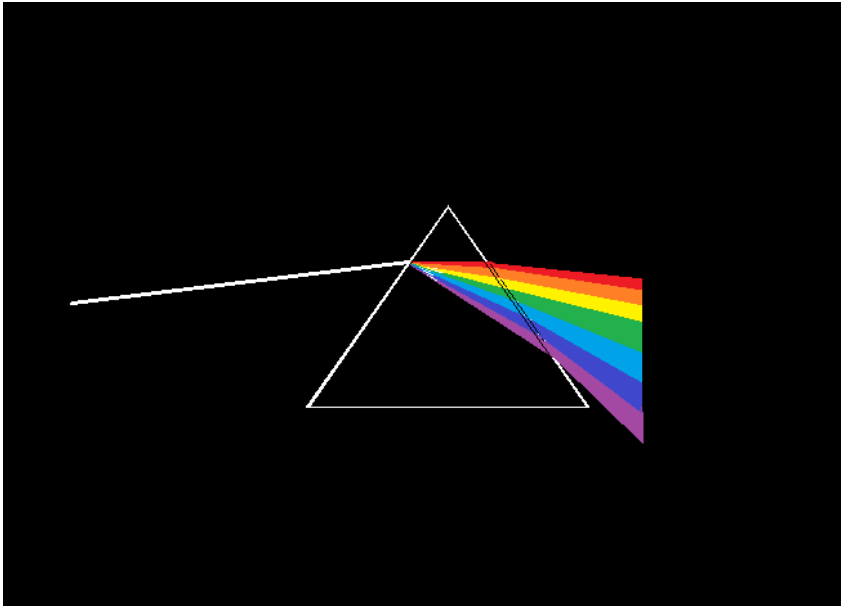
Nesta época foi feita uma divisão na área da óptica. Os físicos trataram de estudar a natureza e fenômenos luminosos, fazendo da óptica um capítulo da física. Os fisiologistas estudaram o olho humano como um órgão sem grandes preocupações com fenômenos da luz que ocorrem dentro dele. E os psicólogos tentavam interpretar o funcionamento da mente associada à visão.

## **2.5 Onda ou partícula;[BERNARDO, 2009], [RONCHI, 1957], [HECHT,... ]**

Isaac Newton (1642-1727) tinha uma concepção diferente sobre a luz: “um feixe de luz, é um feixe de partículas e viajam em linha reta”. A luz para Newton tinha uma natureza corpuscular. Ao fazer trabalhos experimentais com prisma, ele conclui que a luz branca é composta de várias outras cores e, ao atravessar um meio como o prisma, usado em sua experiência, ela sofre uma dispersão de maneira a ser possível observar as cores que a constitui. A grande razão de Newton rejeitar a teoria ondulatória era o fato de que a luz, ao passar por um orifício, continuava sua trajetória em linha reta e uma onda ao encontrar este orifício formaria outras frentes de ondas, indo em todas as direções.



**Fig. 2.6 Isaac Newton (1642- 1727).**



**Fig. 2.7** Representação da dispersão da luz branca em um prisma.

Um curioso problema acontecia no uso das lentes. As lentes apresentavam cores em suas bordas ao fazer observações com ela. Este problema foi chamado de aberração cromática, a qual Newton se propôs resolver, porém ele desistiu de dar uma solução para este problema e erradamente concluiu que não tem como fazê-lo e fez uso de um espelho côncavo pela primeira vez em 1668. Na mesma época, Christiaan Huygens (1629-1695), na Holanda, trabalhava em uma explicação ondulatória para a natureza da luz, e que a luz ao entrar em um meio mais denso diminui sua velocidade, ao contrário do que outros grandes nomes da época como Newton e Descartes afirmavam. Sua teoria ondulatória foi capaz de explicar muito bem fenômenos como a refração, reflexão e enquanto trabalhava com calcita, um mineral transparente e cristalino, descobriu o fenômeno da birrefringência, um fenômeno ondulatório. Huygens descobriu a propriedade da polarização da luz.





**Fig.2.8 Fenômeno da birrefringência na calcita.**

Seja onda ou partículas, a luz era muito rápida, e muitos acreditavam ser um fenômeno instantâneo de velocidade infinita. A luz tem uma velocidade finita e isso foi proposto e medido pela primeira vez por Dane Christensen Romer (1644-1710) ele fez observações da lua de Júpiter fazendo observações de eclipses e chegou a valores bem próximos da real velocidade da luz, ele chegou a valores como  $2,3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

Hooke não aceitava muito bem essa ideia de que a luz tinha uma velocidade tão alta e não infinita. Mas isso não teve grande efeito, pois Romer tinha a aprovação de Newton, que tinha a palavra de maior peso na época. Graças a essa grande influência de Newton, parecia que a teoria ondulatória não fazia sentido, mas isso não impediu que um habilidoso matemático, Leonhard Euler (1707-1783), não se interessasse pela explicação ondulatória para a luz. Ele propôs que o problema das cores indesejadas nas lentes poderia ser resolvido, ao contrário do que Newton achava. Isso estimulou um professor de Upsala, professor Samuel Klingensjtjerna (1698-1765), que refez o experimento de Newton e fazendo contato com um oculista de Londres, John Dollond (1706-1761), que observava resultados similares aos do professor. Dollond, em 1758, combinando dois elementos conseguiu resolver o problema, que antes era dito impossível por Newton, construindo uma lente acromática. Este trabalho foi de grande importância para a ciência.

Euler aos 58 anos perdeu a visão do segundo olho, mas deu continuidade aos seus trabalhos graças a seus filhos, alguns alunos e seu fiel criado que escrevia suas ideias, uma boa parte de sua biblioteca se perdeu em um incêndio sendo salvos apenas seus manuscritos. Euler dizia que o sol era como um sino que ao invés de emitir som, emitia ondas luminosas e o éter era quem conduzia essas ondas até a terra.

## CAPÍTULO 3- AS CONTRADIÇÕES ENTRE NEWTON E HUYGENS(ONDA-PARTÍCULA).

### 3.1 Transição intelectual. [BERNARDO, 2009], [PIRES, 2008].

Nos séculos XVII e XVIII, o mundo estava passando, por uma transição intelectual, a razão e o uso da natureza de uma maneira mais útil para o homem, vem se tornando cada vez mais importante para os pensadores, nascia assim, na Europa o movimento ao qual chamamos de iluminismo, ocupando o lugar da antiga revolução científica. Contra a intolerância religiosa e o estado, este movimento foi cada vez mais dando liberdade aos pensadores de se expor, este também é conhecido como século das luzes. No século XVIII deu início a acontecimentos, principalmente na Europa e por grandes nomes já citados neste trabalho, fizeram com que as concepções e principalmente os métodos de se interpretar a natureza tivessem profundas mudanças.

### 3.2 Huygens e a teoria ondulatória[BERNARDO, 2009], [PIRES, 2008].

No entanto ainda se discutia a real natureza da luz. Cristian Huygens em sua obra, *Tratado sobre a luz*, apresentado a academia real de Paris em 1678-79 e publicado, somente em 1690, deixa claro a natureza ondulatória da luz. O que era um pensamento completamente contrario ao de Newton e isto gerou uma polêmica discussão, que na verdade nos acompanha até hoje.

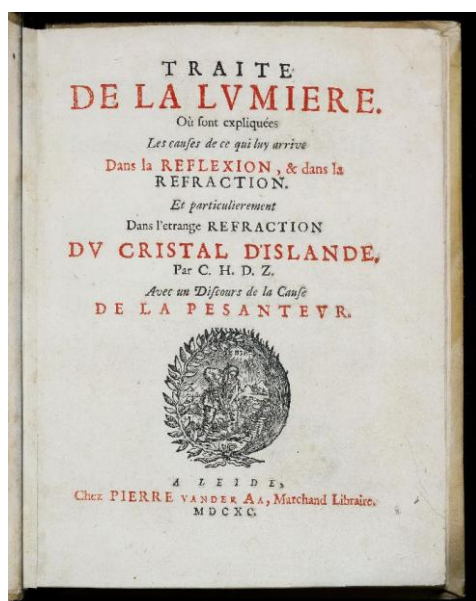


Fig. 3.1 Capa do livro de Huygens, Tratado sobre a luz publicado em 1690.

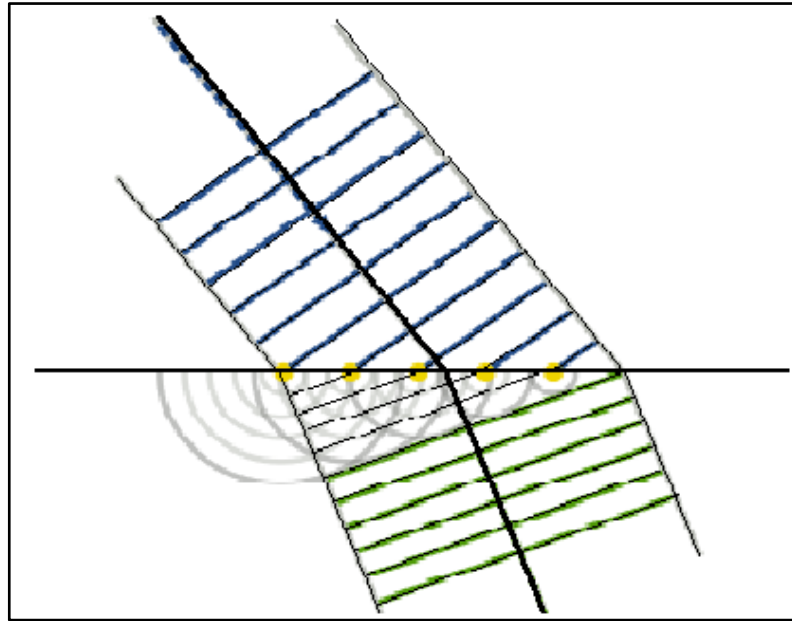
A difícil aceitação destas ideias se deu a grande autoridade de Newton naquela época, graças a grande aceitação das ideias contidas no *principia*. Apesar das grandes contradições de teorias entre Newton e Huygens, ambos tinham um profundo respeito e admiração um pelo outro e talvez devido a este respeito, eles evitavam críticas públicas um pelo outro.

O nome de Huygens é muito lembrado hoje em sala de aula, principalmente pelo o que chamamos de princípio de Huygens. Ele também desenhou o primeiro relógio de pêndulo, fez estudo em diversas áreas e fez descobertas que Galileu não pode fazer, pois estava limitado com a tecnologia de seu telescópio da época, como o maior satélite de Júpiter.



**Fig.3.2** Cristian Huygens (1629-1695).

A princípio Huygens tinha por finalidade resolver alguns problemas com a teoria cartesiana para a luz. As esferas de éter de Descartes, responsáveis pela propagação da pressão, na teoria de Huygens podem assumir outras formas além de esferas e possui elasticidade, essa elasticidade estava relacionada com a densidade do meio e justificaria a sua maior velocidade em meios mais densos. Cada frente de onda transmite energia para a partícula seguinte que compõe o meio a qual está se propagando.

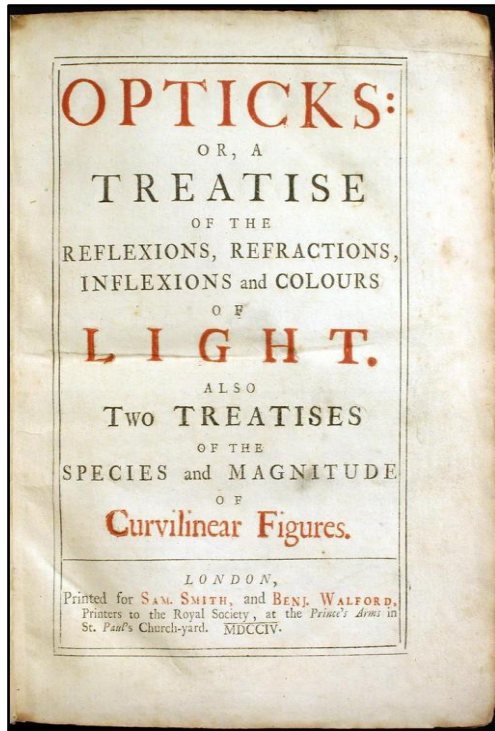


**Fig.3.3** Fenômeno da refração segundo Huygens, cada ponto amarelo da figura passa a atuar como uma fonte pontual, gerando frentes de onda no outro meio.

Na fig.19, as linhas azuis, representam as frentes de onda luminosa antes de ela entrar no meio mais denso. A distância entre estas linhas são maiores em relação às frentes após a entrada no meio, porém ela leva o mesmo intervalo de tempo, pois há uma continuidade destas linhas que representam as frentes de onda. Isto justifica a sua menor velocidade neste meio mais denso.

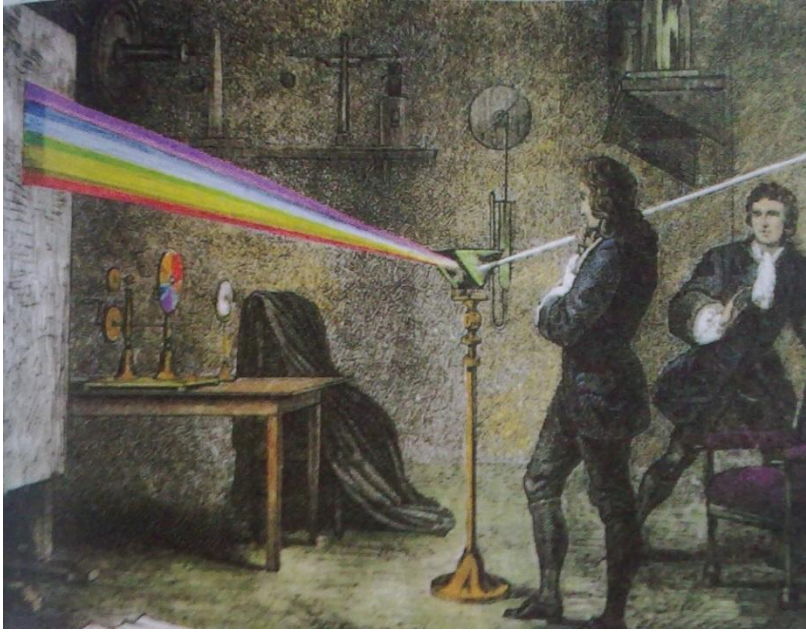
### **3.3 O modelo corpuscular de Newton. [BERNARDO, 2009], [PIRES, 2008].**

Em 1704 era publicado, na Inglaterra, um trabalho de Isaac Newton que esperou quase 30 anos para ser visto, graças as controvérsias que teve com Hooke quando apresentou a sua teoria das cores. Devido a uma linguagem mais acessível que o *principia*, este trabalho o qual é chamado de *opticks*, teve uma maior repercussão e difusão na sociedade.



**Fig.3.4**Capa do livro Optcks de Sir Isaac Newton.

A luz tratada nesta obra tem a sua natureza corpuscular, a luz sendo assim composta por pequenas partículas (corpúsculos), como já se pensava na Grécia antiga. Este modelo explicava bem alguns fenômenos. Cada partícula ou corpúsculo, segundo Newton, tinha a mesma velocidade no ar, no entanto, ao passar por um prisma cada corpúsculo assumia uma velocidade diferente, o vermelho tinha a maior velocidade, pois sofria o menor desvio e o violeta é o mais lento, por sofrer maior desvio. Com base nisso, ele explicava o fenômeno da dispersão, observado nos seus experimentos com o prisma.



**Fig.3.5 Newton observando a decomposição da luz branca ao passar por um prisma.**

Este modelo de partículas explicava bem a trajetória que a luz descrevia ao passar por uma fenda ou na formação de sombras, pois a luz não podia contornar obstáculos como fazia o som. Newton explicava a reflexão como uma colisão da luz com a superfície, assim como um corpo atinge uma superfície e explicou também a refração usando suas ideias de gravitação. A luz por ser composta por partículas, ao passar de um meio para outro, sofre interação nesta mudança de meios, desviando sua trajetória e mudando sua velocidade. A direção era até fácil de mostrar, pois era visível que um feixe ao passar de um meio para outro sofre um desvio, porém sua velocidade era algo improvável de se medir em um recipiente (um espaço tão pequeno). Na época e o que se esperava, era que a velocidade aumentasse, pois teria uma interação de caráter corpuscular com o meio. É importante lembrar que Newton usava as propriedades de partícula para explicar os fenômenos observados por ele, porém, ele mesmo não tinha certeza da natureza corpuscular da luz, este modelo explicava bem estes fenômenos, mas o próprio Newton tinha dúvidas quanta a este assunto.

## **CAPÍTULO 4 - RESURGIMENTO DA TEORIA ONDULATÓRIA.**

### **4.1 Young e Fresnel[BERNARDO, 2009], [HECHT, 1987].**

A teoria ondulatória voltou a ser uma possível explicação para a natureza da luz, quando Thomas Young (1773-1829), adicionou mais um fenômeno para a teoria ondulatória, a interferência. Ele foi capaz de explicar as diferentes cores que apareciam em películas muito finas, como nas bolhas de sabão que ficam com sua superfície colorida. Ele determinou diversos comprimentos de onda para a luz visível, utilizando dados de Isaac Newton. Young foi muito criticado em diversos artigos, pois suas teorias, apesar de usar dados obtidos por Newton eram contrárias a teoria corpuscular de Isaac Newton, uma vez que a Inglaterra não tinha dúvidas de que Newton estava certo em suas afirmações, o que deixou Young muito desanimado.



**Fig.4.1 Thomas Young (1773-1829).**



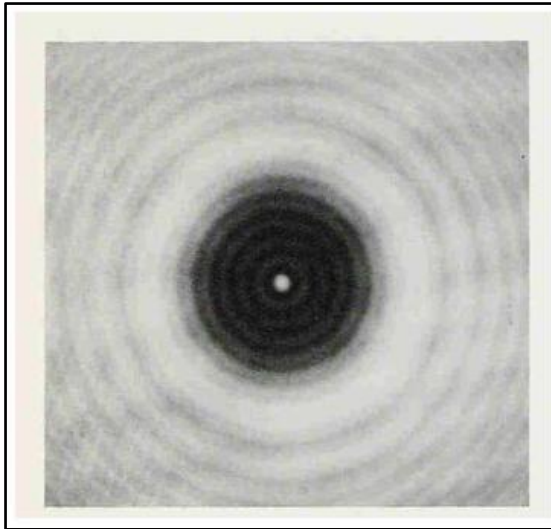
O francês Augustin Fresnel (1788-1827), de maneira genial, fez reviver a teoria ondulatória, na França, mesmo sem saber do grande esforço de Young há 13 anos, pois como atuou em boa parte de sua vida como engenheiro civil ficou por fora das novidades científicas. Ele acreditava que a luz era uma onda luminosa e assim como as ondas sonoras, esta era longitudinal e observou o fenômeno da difração já antes visto por Young o que lhe rendeu críticas de grandes nomes da época, como Simon de Laplace (1749-1827) e Jean Baptiste Biot (1774-1862).



**Fig. 4.2 Augustin Fresnel (1788-1827).**

A teoria ondulatória de Fresnel tomou uma ênfase matemática. Ele era capaz de calcular a difração de várias aberturas e obstáculos. Um fato curioso durante uma apresentação de Fresnel. Um matemático e defensor da teoria corpuscular, Denis Possion (1781-1840), previa um absurdo se a teoria de Fresnel estivesse correta, um ponto brilhante apareceria em uma sombra projetada por um disco circular. Pois bem, foi feito o experimento e para a surpresa de Possion, o ponto realmente apareceu e este ponto ficou conhecido como ponte de Possion. No final, Fresnel ficou sabendo da prioridade de Young com sua teoria, que na verdade o foco da pesquisa era sobre o princípio da interferência, Fresnel ficou decepcionado com isso, mas os dois se tornaram grandes amigos.





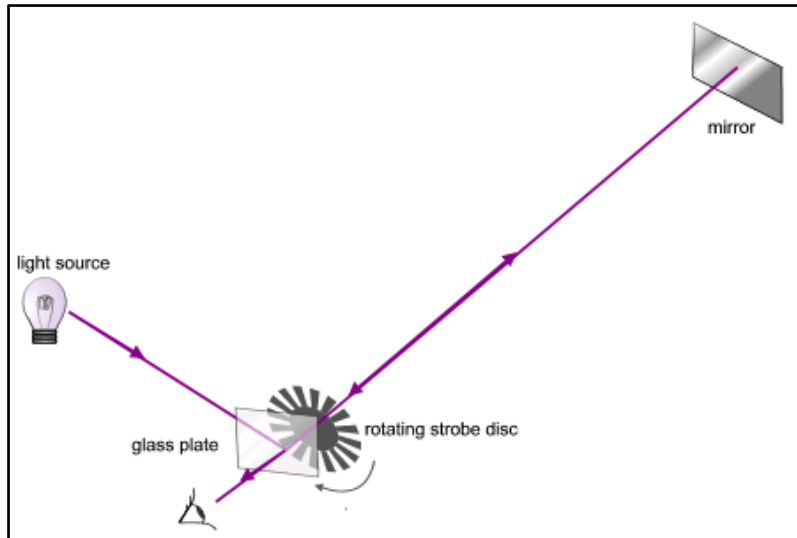
**Fig. 4.3 Ponto de Poisson.**

#### **4.2 A experiência de Fizeau [BERNARDO, 2009]**

Com o objetivo de medir a velocidade da luz, sem o uso de espelhos rotacionais, como era usado na época. Armand-Hippolyte-Louis Fizeau, (1819-1896). Usou um experimento, que se baseava no uso de rodas dentadas como mostra a fig.19. No qual ele precisava conhecer a frequência de rotação desta roda e a distância entre os dois espelhos. Fizeau conseguiu em 1849, antes de seus concorrentes, medir a velocidade da luz no ar. Em seguida, usando o índice de refração do ar, estimou que a velocidade da luz no vácuo fosse cerca de  $3,15 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .



**Fig.4.4 Armand-Hippolyte-Louis Fizeau, (1819-1896).**



**Fig. 4.5** Experiência de Fizeau

### **4.3 Foucault [BERNARDO, 2009].**

Em 1850, Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) realizou um experimento e neste experimento, verificou que a velocidade da luz na água é menor do que no ar. Foucault mediu a velocidade da luz e comprovou que esta velocidade era inferior após sofrer a refração na passagem para o meio mais denso, isso derrubaria a hipótese de Newton, de que a luz aumentaria a velocidade devido à interação gravitacional que tinha com o meio mais denso. Isso sem duvida deixaria Huygens satisfeito.



**Fig. 4.6** Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868).

Fizeau e Foucault, tiveram uma estreita parceria em experimentos referentes a medição da velocidade da luz. No entanto quando, em 1850, ano em que Foucault conseguiu um satisfatório resultado para a velocidade da luz na água, como já mencionado. Foucault fez algumas modificações no arranjo de seus experimentos. Introduzindo espelho um côncavo no lugar do espelho plano. Acredita-se que isso provocou um afastamento entre os dois cientistas. Pois não há mais registros de trabalhos em parceria após este ano.

#### **4.4 Ondas eletromagnéticas [NUSSENZVEIG, 2014], [TIPLER, P.A.; LLEWELLYN, R.A, 2014].**

Em paralelo aos estudos feitos na óptica, grandes descobertas e avanços na eletricidade e no magnetismo foram feitos nos séculos XVIII e XIX.

James Clerk Maxwell (1831-1879) foi um físico escocês que com sua excelente formação matemática foi um dos fundadores da mecânica estatística. Sua grande afinidade com a matemática fez com que tivera uma importante parceria com um dos maiores físicos experimentais, Michael Faraday (1791-1867) que fez importantes contribuições não só para a física, mas também para a química. Maxwell impressionado com as atividades de Faraday, tratou de fazer formulações matemáticas para definir o que antes Faraday definia como linhas de forças. Faraday conta em uma carta a Maxwell: “Fiquei quase assustado vendo tamanha força matemática aplicada ao tema e maravilhado ao perceber que ela a aguentou tão bem”.

Dessas parcerias e formulações matemáticas, surgiram o que chamamos de “equações de Maxwell”. Essas equações

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} &= \vec{0} \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\end{aligned}$$

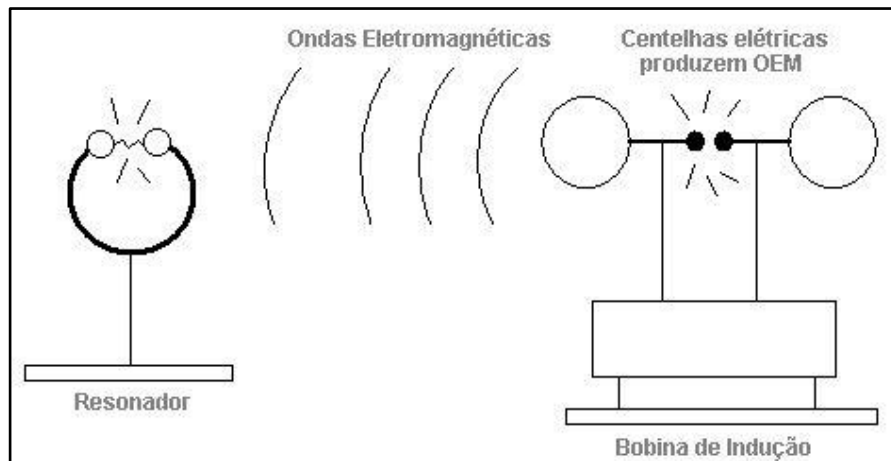
**Fig. 4.7 Equações de Maxwell.**

Maxwell havia chegado nesses resultados em sua casa de campo. Resolvendo essas equações ele verificou que seu resultado tinha a estrutura de uma equação de onda, sendo o termo que descrevia a velocidade ao quadrado, dependia de duas constantes. Ao regressar para Londres, verificou os valores dessas constantes de permissividade elétrica e permeabilidade magnética. Os valores para a velocidade da luz era conhecida por experiências terrestres feitas por Fizeau e por Foucault e pela experiência astronômica feita por Christensen Romer, coincidiam com seus resultados.

Ao verificar seus resultados escreveu em um trabalho de 1862.

A velocidade das ondas transversais em nosso meio hipotético, calculada a partir dos experimentos eletromagnético dos Srs. Kohlrausch e Weber, concorda tão exatamente com a velocidade da luz, calculada pelos experimentos do Sr. Fizeau, que é difícil evitar a inferência de que *a luz consiste nas ondulações transversais do mesmo meio que é causa dos fenômenos elétricos e magnéticos*. Maxwell concluiu que a luz é uma onda eletromagnética. (NUSSENZVEIG, 2014 **pág. 245**).

Em 1888, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), usando um experimento conhecido como experimento de Hertz, comprovou a existência de ondas eletromagnéticas propostas por Maxwell, este experimento marcou a história da física pois consolidava a hipótese de que a luz era uma onda eletromagnética.



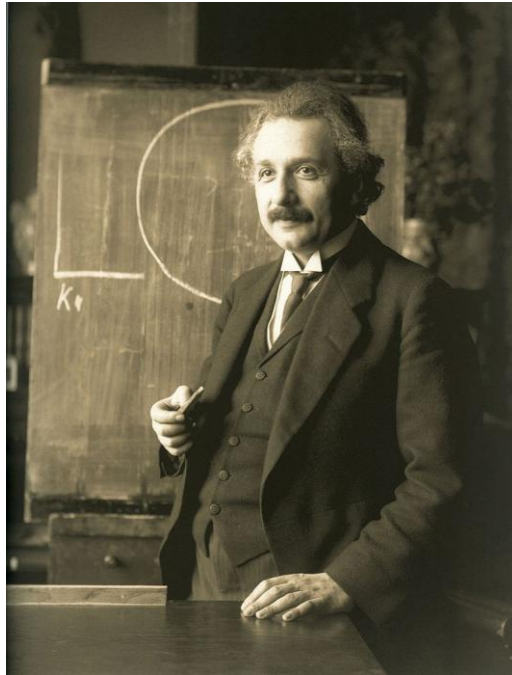
**Fig. 4.8 Experimento de Hertz.**

Hertz viu que a centelha gerada na antena emissora, tinha uma centelha na antena receptora, mesmo que separadas a uma grande distância de alguns metros. Hertz medindo o comprimento de onda e a frequência dessas ondas pôde calcular sua velocidade de propagação e chegando ao mesmo valor obtido por Maxwell.

Os fenômenos elétricos e magnéticos, antes estudados separadamente. Além de serem fenômenos associados entre si, como foi visto por Faraday, mostrando que a variação de um campo magnético produz uma corrente elétrica e que, a experiência de Christian Osterd (1777-1851) que verificou que a corrente elétrica produz um campo magnético.

Além disso, esses fenômenos agora são associados a natureza ondulatória da luz e fecham o século com a certeza que a luz é uma onda, mais do que isso, a luz é uma onda eletromagnética.

Mas a natureza corpuscular da luz volta a ser falada, quando um estranho efeito, visto pela primeira vez em 1887 pelo próprio Hertz. Mas só em 1921 recebeu a correta explicação dada por Albert Einstein (1879-1955), o que lhe rendeu um prêmio Nobel no mesmo ano pela explicação a qual chamamos de efeito fotoelétrico. A luz ao incidir em uma placa metálica, ejetava elétrons, o curioso era que a ejeção destes elétrons não depende só da intensidade, mas principalmente da frequência da radiação emitida sobre a placa metálica.



**Fig. 4.9 Albert Einstein em 1921**

#### **4.5“Conclusão sobre a natureza da luz”.**

Vimos como as teorias e propostas para explicações de como nosso mundo funciona passa por constantes modificações. Essas modificações se dão à medida que criamos tecnologias para entendermos melhor aquilo que não podemos ver. O mecanismo da visão e a luz passaram por mudanças ao longo dos séculos e até hoje ainda não sabemos de fato qual a sua natureza. O experimento de Mach- Zehnder deixa claro que ainda não sabemos qual a real natureza da luz. Uma vez que a luz, hora se comporta como partícula e outra hora se comporta como onda. Acabou que não se deu um nome a sua natureza, mas um nome para o problema, a dualidade onda-partícula.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os conceitos de física normalmente vêm sendo abordados de uma maneira pouco lúdica e conceitual. Formulas são lançadas no quadro forçando o aluno, simplesmente a decorar as equações e os tornando “robôs de repetição”, de maneira que, na maioria dos casos, esses jovens nem fazem ideia do que estão calculando de fato.

As aulas normalmente são cansativas e os alunos não veem a hora de acabar a aula. Podemos fazer algo mais dinâmico e de maneira mais conceitual e fazendo uma abordagem histórica de modo a dar um sentido nas leis físicas abordadas em sala de aula.

Outras diferentes estratégias podem ser tomadas, como o uso de vídeos, softwares e até mesmo uso de habilidades com desenho e música. Com o objetivo, não só de chamar a atenção do aluno, mas conquistá-lo.

A abordagem histórica é uma das maneiras de se introduzir certos temas da física como a óptica, mas isto não se prende somente a mesma, mas qualquer tema pode ser introduzido com um contexto histórico e dando sua importância econômica e militar em determinada época.

## REFERÊNCIAS

NUSSENZVEIG, H.M. **Física básica – v. 3**.2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2015.

YOUNG, H.D.; FREEDMAN, R.A. **Física – v.3**. 12.ed. São Paulo: Addison Wesley, 2009.

BERNARDO, L. M. **História da Luz e das Cores- v.1**. 2 ed. Univ. do Porto, Porto, 2009.

RONCHI, V. "**Optics - The Science of Vision**" (New York Univ. Press, NY, 1957).

PIRES, A.S.T. **Evolução das ideias da física – 1 ed.** São Paulo: São Paulo, 2008.

SELLERS, D. **In Search of William Gascoigne: Seventeenth Century Astronomer** ed. Springer Science & Business Media, New York ,2012.

TIPLER, P.A.; LLEWELLYN, R.A. **Física Moderna** 6 ed. Rio de Janeiro, 2014.

HECHT, E. **Optics** 4 ed. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1987.